

# Gravedad y Cosmología Cuánticas de Lazos



Guillermo A. Mena Marugán  
Instituto de Estructura de la Materia  
CSIC

Santiago, septiembre de 2014



# Gravedad cuántica

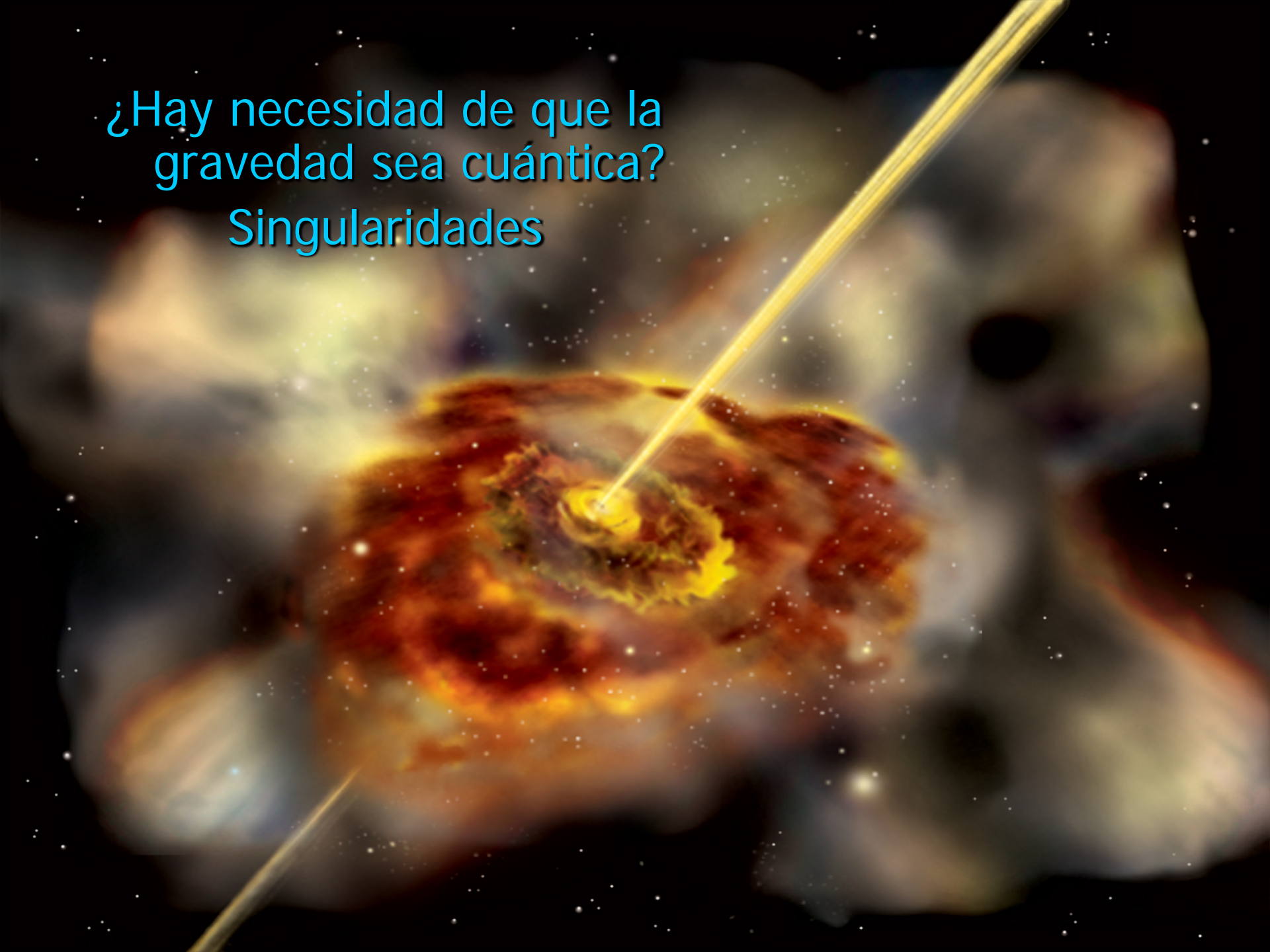


¿Hay necesidad de que la  
gravedad sea cuántica?  
Singularidades





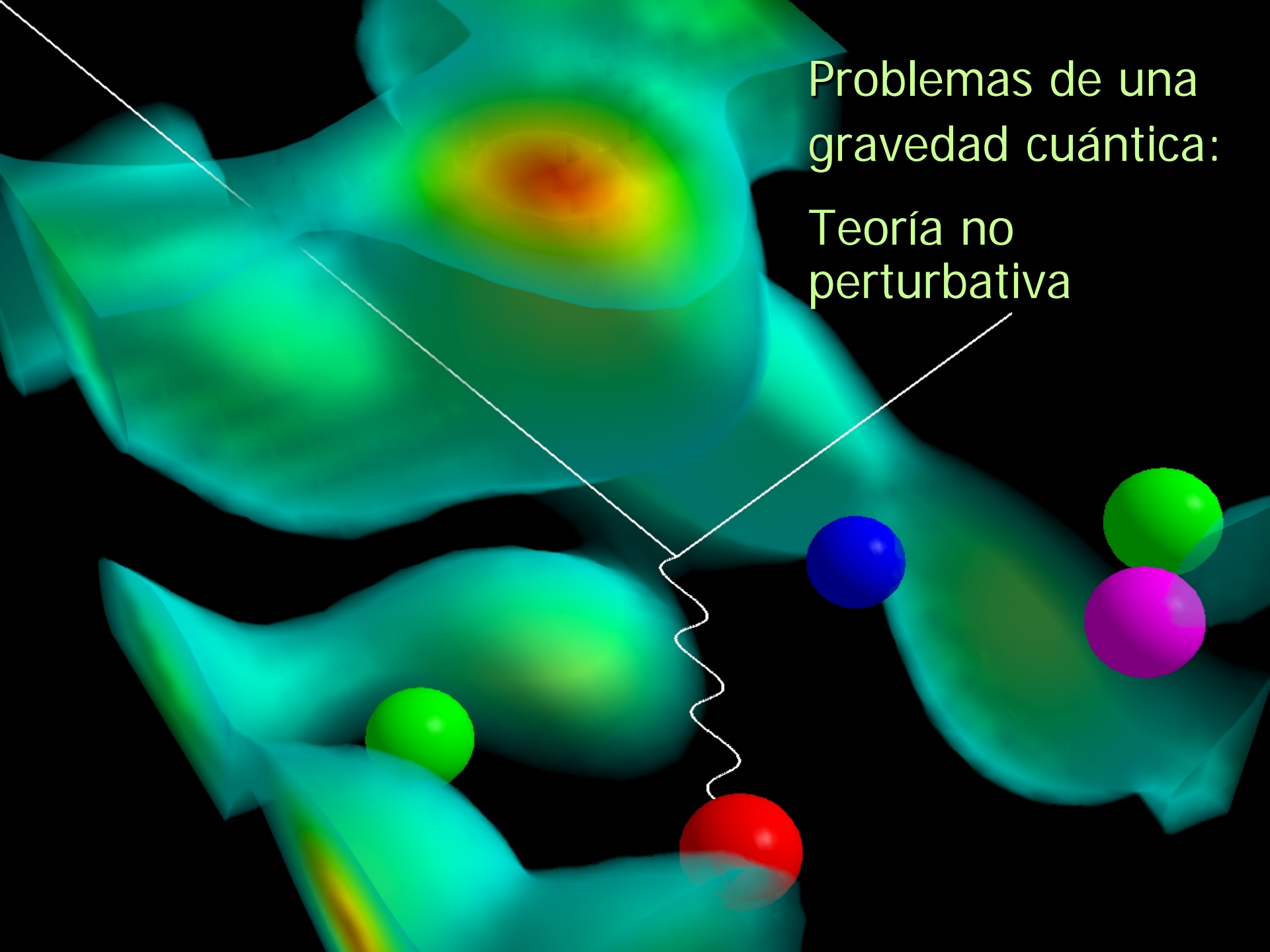
¿Hay necesidad de que la  
gravedad sea cuántica?  
Singularidades





Problemas de una  
gravedad cuántica:

Teoría no  
perturbativa



$$N=2 \quad S = \int \sqrt{-g} d^4x \mathcal{R}$$

$\Lambda_\mu$

$G_{\mu\nu}$

$B_{\mu\nu}$

$\Phi$

$R_{1234}$

$$\int_0^\infty \cos^2 u \, du$$

Fresnel

$$R_{\mu\nu} = 0$$

$$\int R^{(2)} d^4x$$

$$\frac{\alpha'}{4} \int d^2\sigma \left( G_{\mu\nu} \partial_\alpha X^\mu \partial_\beta X^\nu h^{\alpha\beta} \right)$$

$$+ \varepsilon^{\alpha\beta} B_{\mu\nu} \partial_\alpha X^\mu \partial_\beta X^\nu$$

$+\Phi$

$+\frac{1}{2} \square \Phi$

$+\frac{1}{2} \square^2 \Phi$

$+\frac{1}{2} \square^3 \Phi$

$+\dots$

Problemas de una gravedad cuántica:

Además, la teoría perturbativa depende del fondo



Problemas de una  
gravedad cuántica:

La causalidad  
depende del  
sistema



Problemas de una  
gravedad cuántica:  
¿Análisis funcional  
sobre  
geometrías?



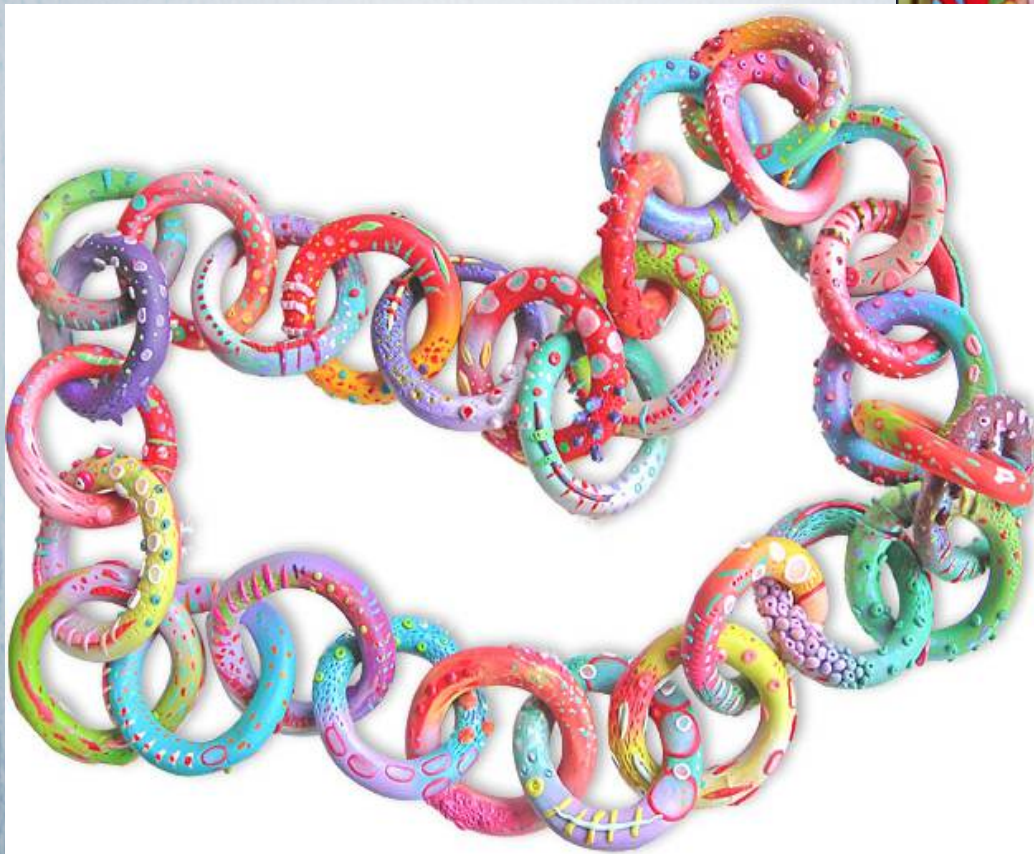


## Transporte paralelo:

- No depende críticamente de la métrica.
- No necesita estructuras de fondo.
- Usa la descripción de teorías gauge.
- Permite un tratamiento no perturbativo.



# Gravedad Cuántica de Lazos (Loops): QUÉ NO ES

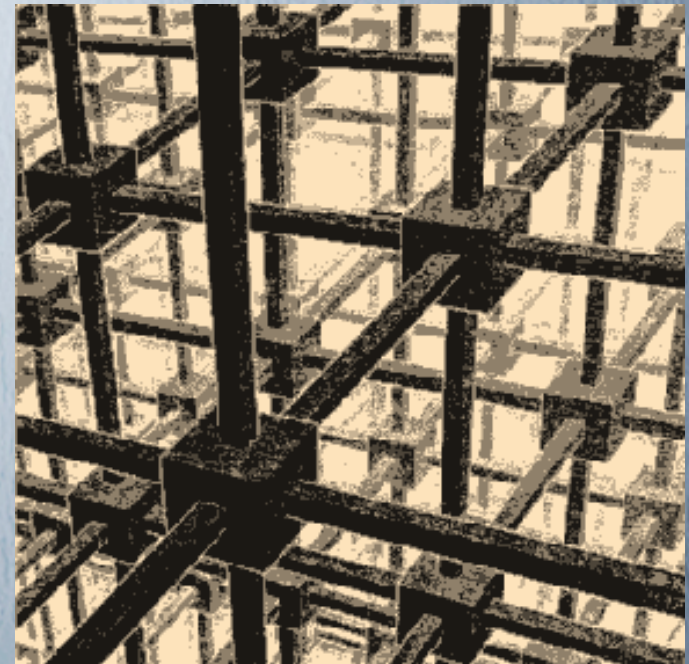






Gravedad Cuántica  
de Lazos:

Se parece al  
mundo de Escher.

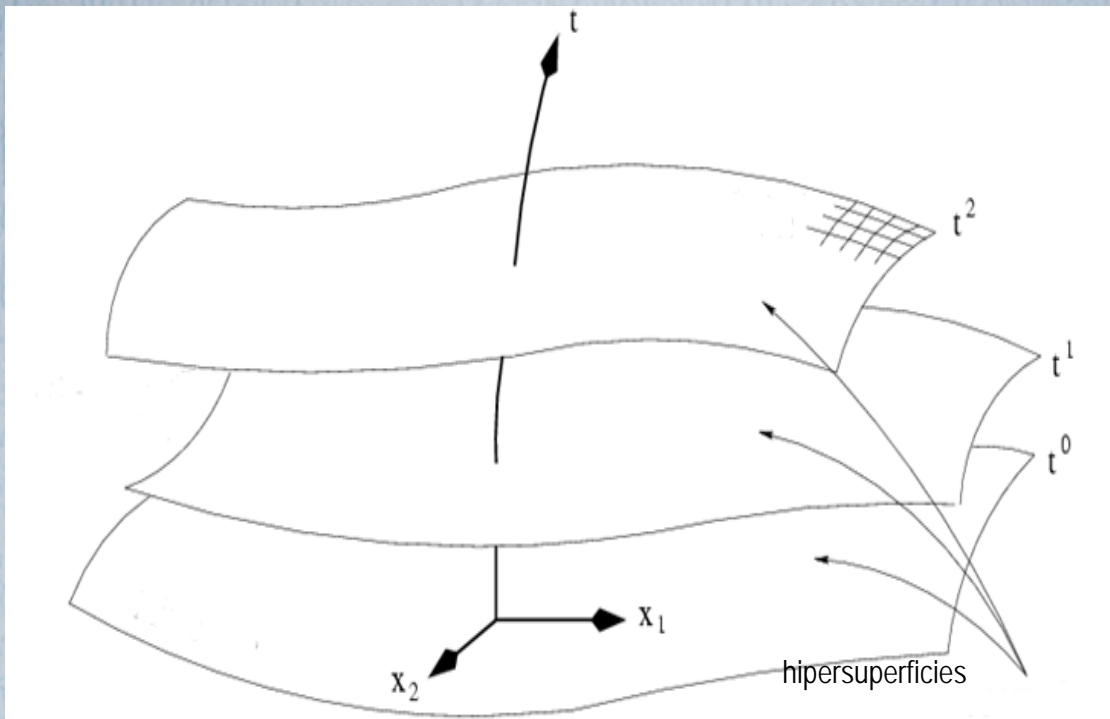




## Gravedad Cuántica de Lazos:

- Basada en la Relatividad General.
- En  $3+1$  dimensiones.
- No perturbativa.
- En el marco de una cuantización canónica.
- Independiente de estructuras de fondo.
- Formulada en un lenguaje de conexiones.
- No pretende ser una teoría de unificación.



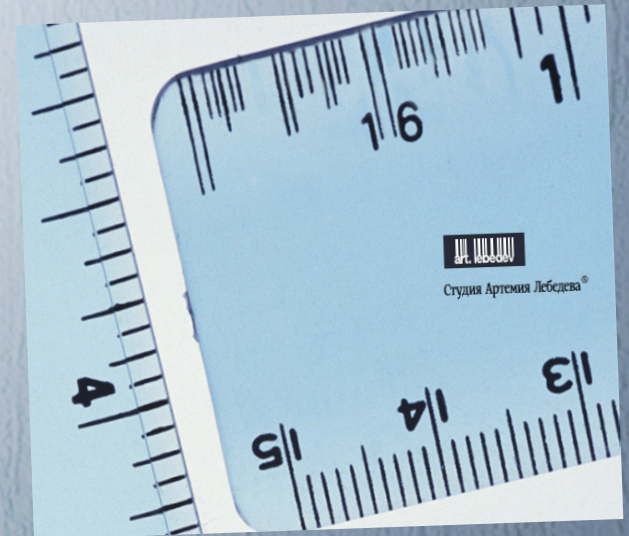


Es un formalismo canónico.

## Variables canónicas:

Métrica espacial:  $ds^2 = q_{ab} dx^a dx^b$

Curvatura extrínseca:  $K_{ab}$



Métrica espacial:

$$ds^2 = q_{ab} dx^a dx^b$$

● Tríada:

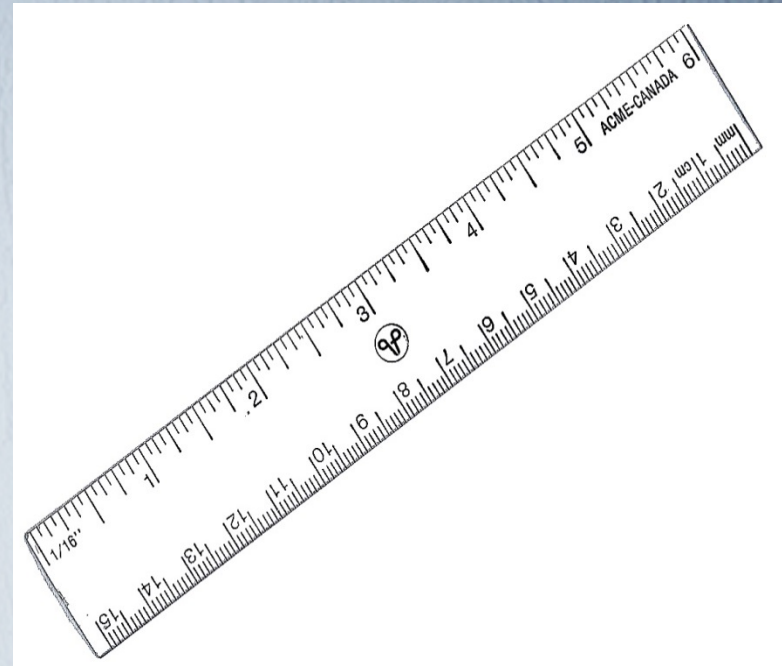
$$q_{ab} = e_a^i \delta_{ij} e_b^j$$

Da un “sistema de referencia”  
en cada punto.

Simetría: la de la métrica plana – rotaciones.

● Tríada densitizada:

$$E_i^a = e_i^a \sqrt{\det q}$$





- Tríada:

$$ds^2 = q_{ab} dx^a dx^b$$

$$q_{ab} = e_a^i \delta_{ij} e_b^j$$

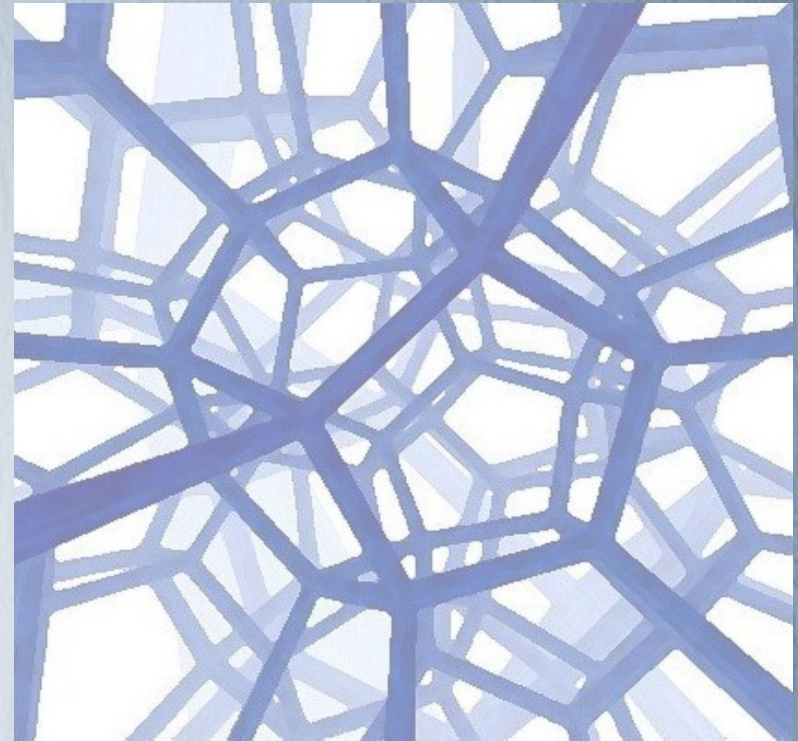
- Curvatura extrínseca:  $K_{ab}$

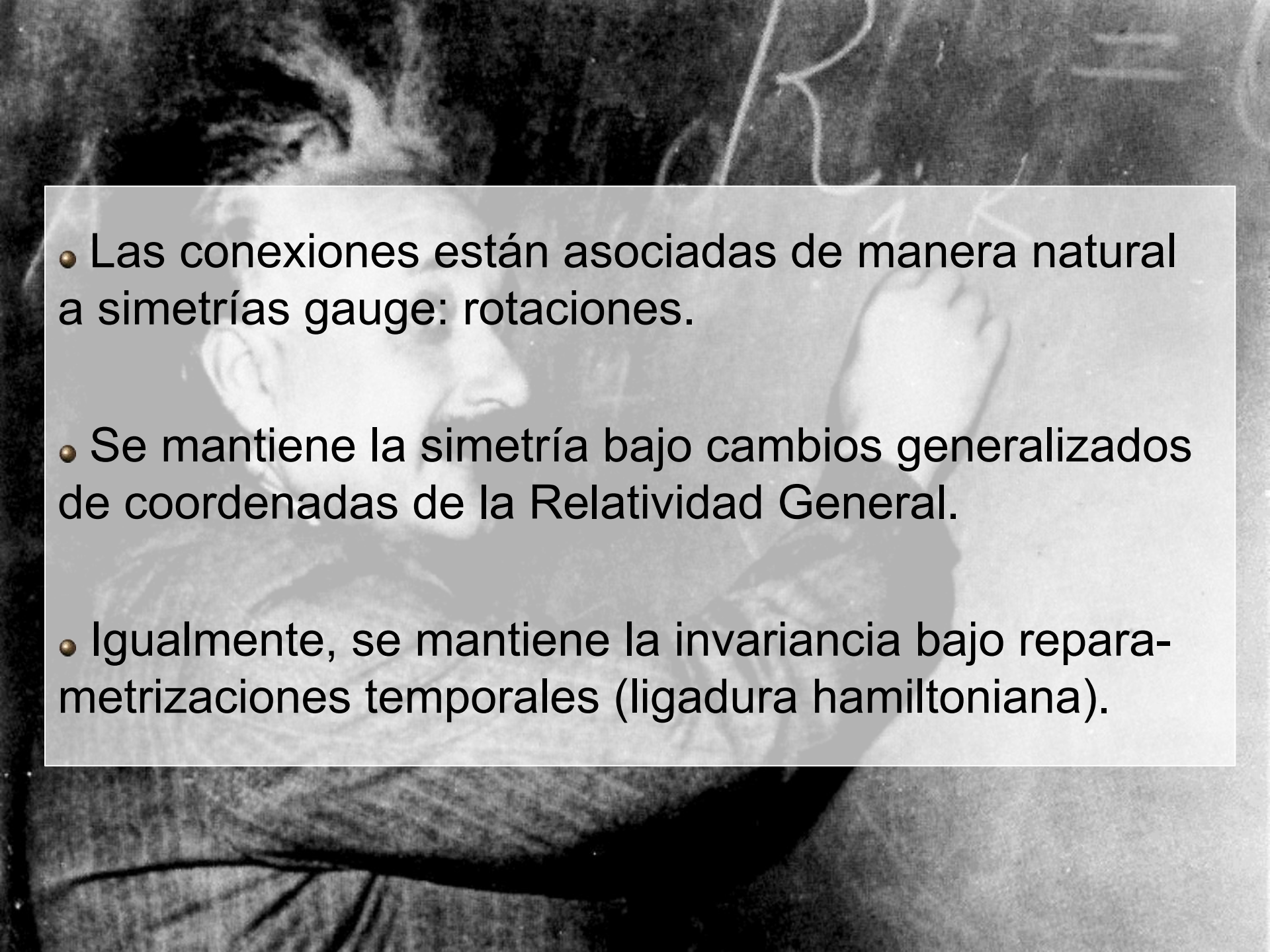
- Conexión:

$$A_a^i = \Gamma_a^i(e) + K_{ab} e^{bi}$$

Conexión compatible con la tríada

Curvatura extrínseca



- 
- Las conexiones están asociadas de manera natural a simetrías gauge: rotaciones.
  - Se mantiene la simetría bajo cambios generalizados de coordenadas de la Relatividad General.
  - Igualmente, se mantiene la invariancia bajo reparametrizaciones temporales (ligadura hamiltoniana).



- Las holonomías dan información sobre el transporte paralelo en un camino (arista).
- Contienen toda la información invariante gauge sobre la conexión en ese camino.
- Al integrar para obtener la holonomía, estamos curando parte de las divergencias del tratamiento de campos.
- HOLONOMÍA:

$$h_l(A) = \exp \int A_a^i \tau_i dx^a$$

base

No aparecen estructuras de fondo.

- Completamos nuestras variables con flujos:

Se definen sin estructuras de fondo

[solo  $\epsilon_{abc}$  - Levi-Cività].

Integramos en superficies. Es el tipo de integración que cura las divergencia de campos.

- FLUJO: 
$$E(S,f) = \int_S E^{ci} f_i(x) \epsilon_{abc} dx^a dx^b$$

La integral da el análogo a un flujo eléctrico.





A woman with long brown hair, wearing a dark green ribbed sweater, is leaning on a stone wall in a garden. She is smiling at the camera. The background shows a well-manicured garden with hedges and trees. On the right side of the image, there is a large, colorful geometric overlay consisting of a network of blue dots connected by yellow and orange lines, forming a complex, interconnected structure. The overall image has a low-poly, geometric aesthetic.

# GEOMETRÍA DISCRETA



# Cosmología Cuántica de Lazos: FRW

- Aplicación a sistemas simples:  
**Homogeneidad e isotropía.**

$$A_a^i \longrightarrow c$$

$$E_i^a \longrightarrow p$$

- Factor de escala:

$$a = \sqrt{|p|}$$

- Representación:

$$\langle c | \mu \rangle = \exp(i \mu c/2); \quad p | \mu \rangle = (1/6) |p|^2 \mu | \mu \rangle$$

- Producto:

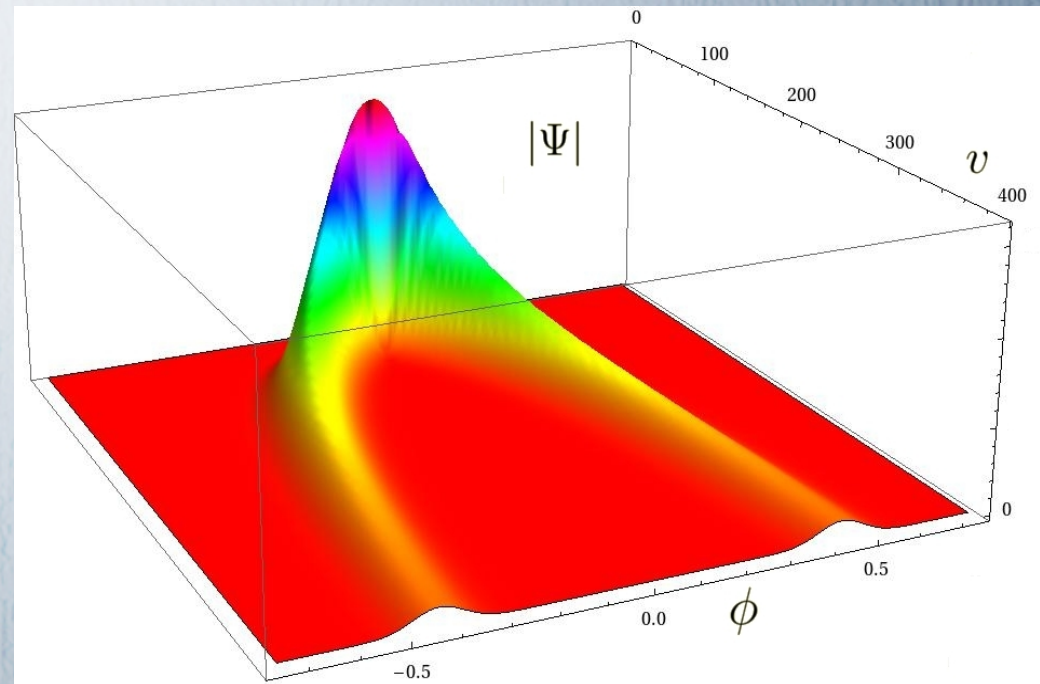
$$\langle \mu' | \mu \rangle = \delta_{\mu' \mu}$$



- La invariancia bajo reparametrizaciones temporales conlleva una ligadura hamiltoniana. Cuánticamente, la ligadura aniquila los **estados físicos**.

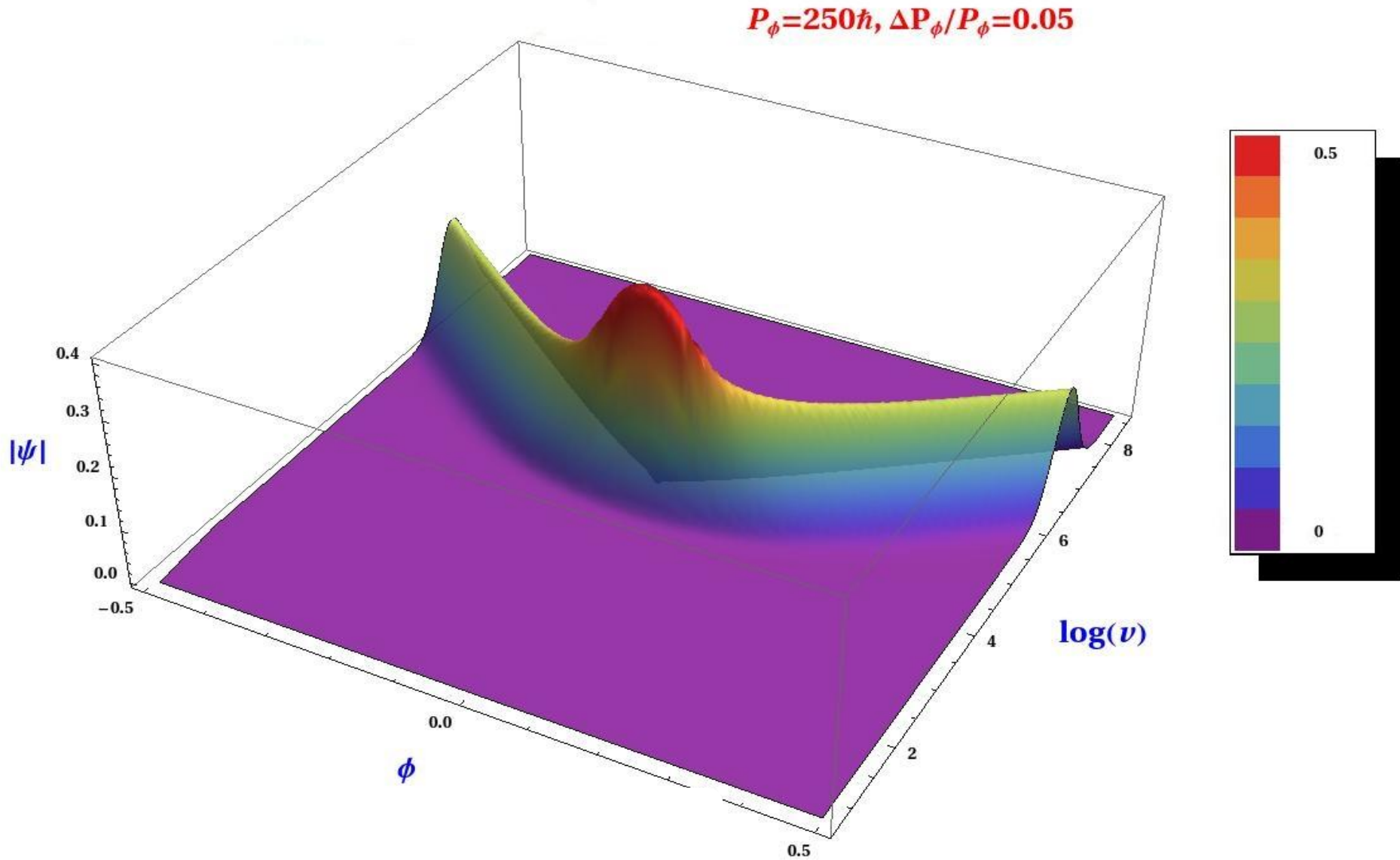
1) Puede verse como una evolución CUÁNTICA.

2) NO hay singularidad: la evolución está bien definida y da lugar a un “Big Bounce”.





# Big Bounce

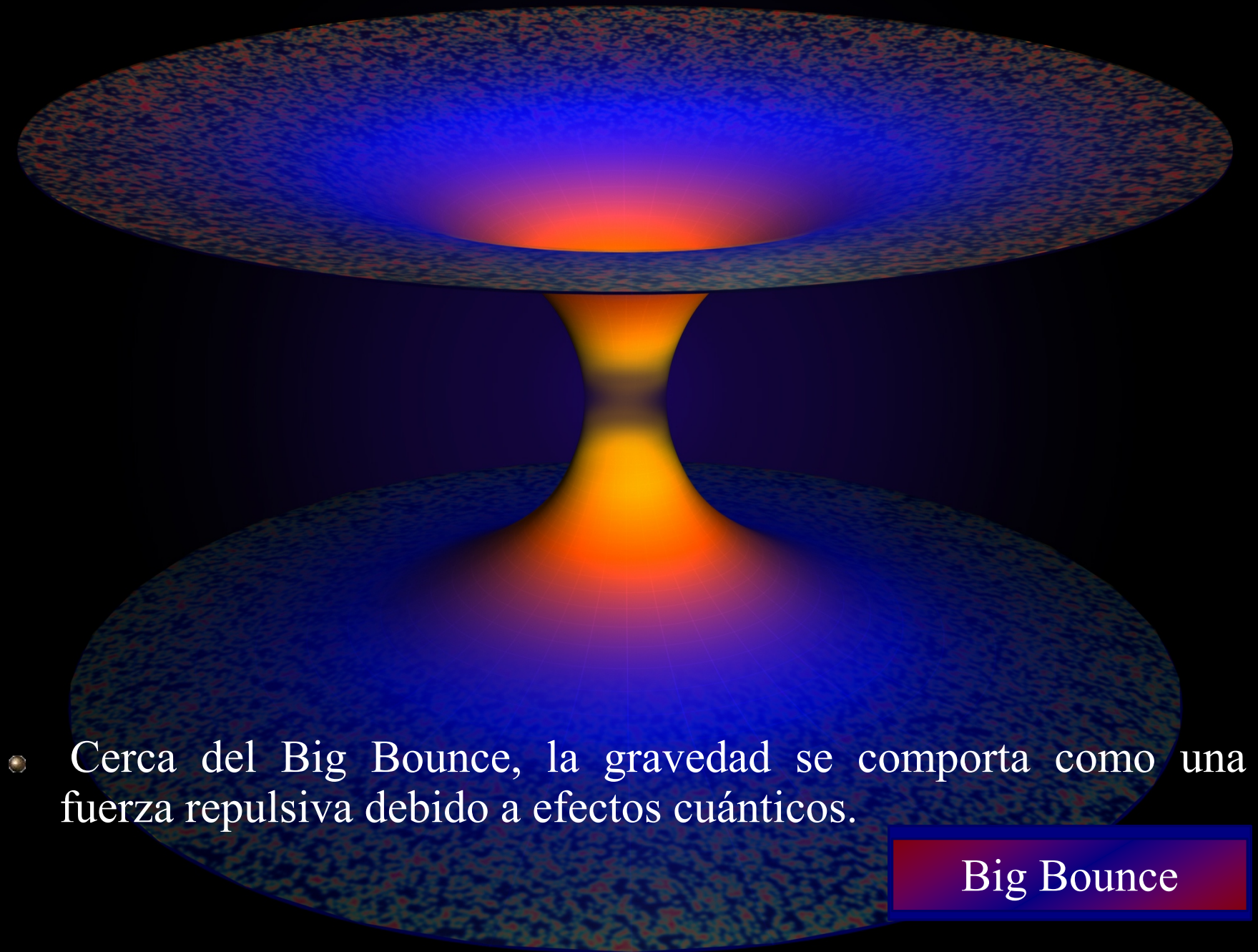




# Big Bounce

- Los estados semiclásicos permanecen **picados**.
- La trayectoria se desvía de la de la Relatividad General cuando  $\rho > 0.01\rho_{crit}$ .
- La escala en la que surgen correcciones es universal:  
$$\rho_{crit} \approx 0.41\rho_{Planck}$$
- La densidad de materia está acotada por  $\rho_{crit}$  en las trayectorias de los picos.
- Esta cota coincide con el **supremo** de los valores del operador densidad.
- La trayectoria sigue una **DINÁMICA EFECTIVA**.



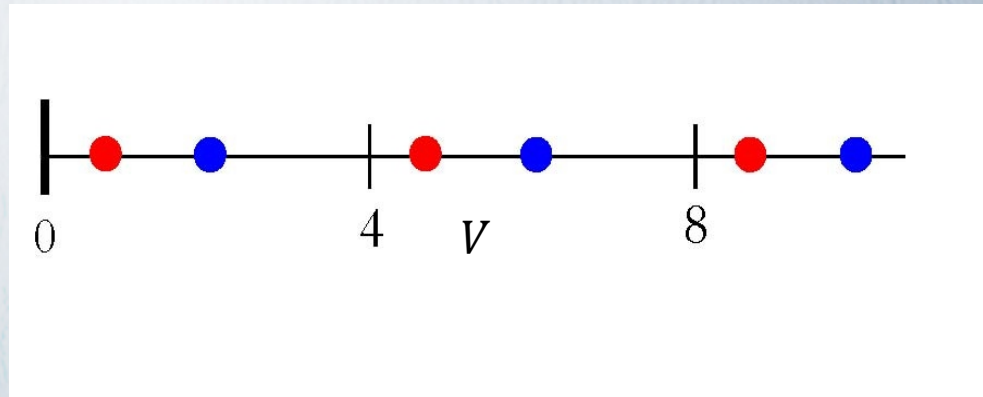


- Cerca del Big Bounce, la gravedad se comporta como una fuerza repulsiva debido a efectos cuánticos.

Big Bounce

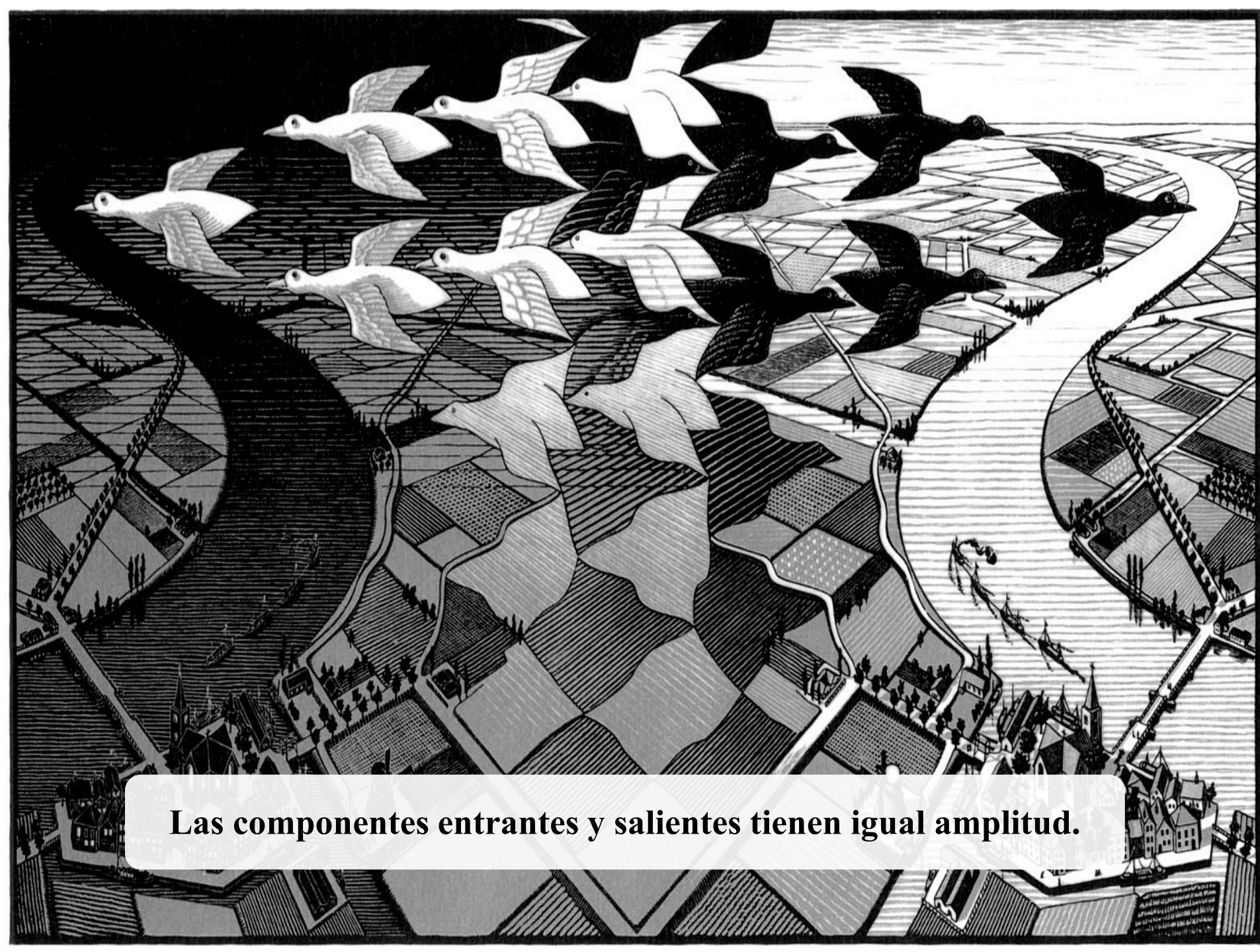
# Rebote cuántico

- Como consecuencia de la naturaleza discreta de la geometría, la ecuación de evolución cuántica es una ecuación de diferencias en el volumen.
- Los estados cuánticos adquieren contribuciones de una secuencia infinita de valores del volumen equiespaciados.



- Las soluciones son superposiciones de estructuras con volumen discretizado en las que las componentes entrantes y salientes tienen igual amplitud. Esto garantiza un rebote cuántico genérico.





**Las componentes entrantes y salientes tienen igual amplitud.**

# Generalidad del rebote

- Usando las ecuaciones **efectivas**, puede demostrarse que las singularidades **fuertes** DESAPARECEN para cualquier tipo de materia en las cosmologías de FRW planas.
- Se obtienen resultados similares en otras cosmologías homogéneas:
  - ➔ **FRW con otros contenidos materiales.**
  - ➔ **FRW no plana.**
  - ➔ **Cosmologías anisótropas (Bianchi I, II y IX).**
- Las **simulaciones numéricas** también confirman el “Bounce”.
- Estos resultados apuntan a una resolución genérica de las singularidades cosmológicas.



## BIG BOUNCE

$10^{-44}$  seconds:  
SPACE-TIME  
IS QUANTISED

PRE-EXISTING UNIVERSE  
Collapse due to gravity

SPACE-TIME IS CLASSICAL

SPACE-TIME  
IS CLASSICAL

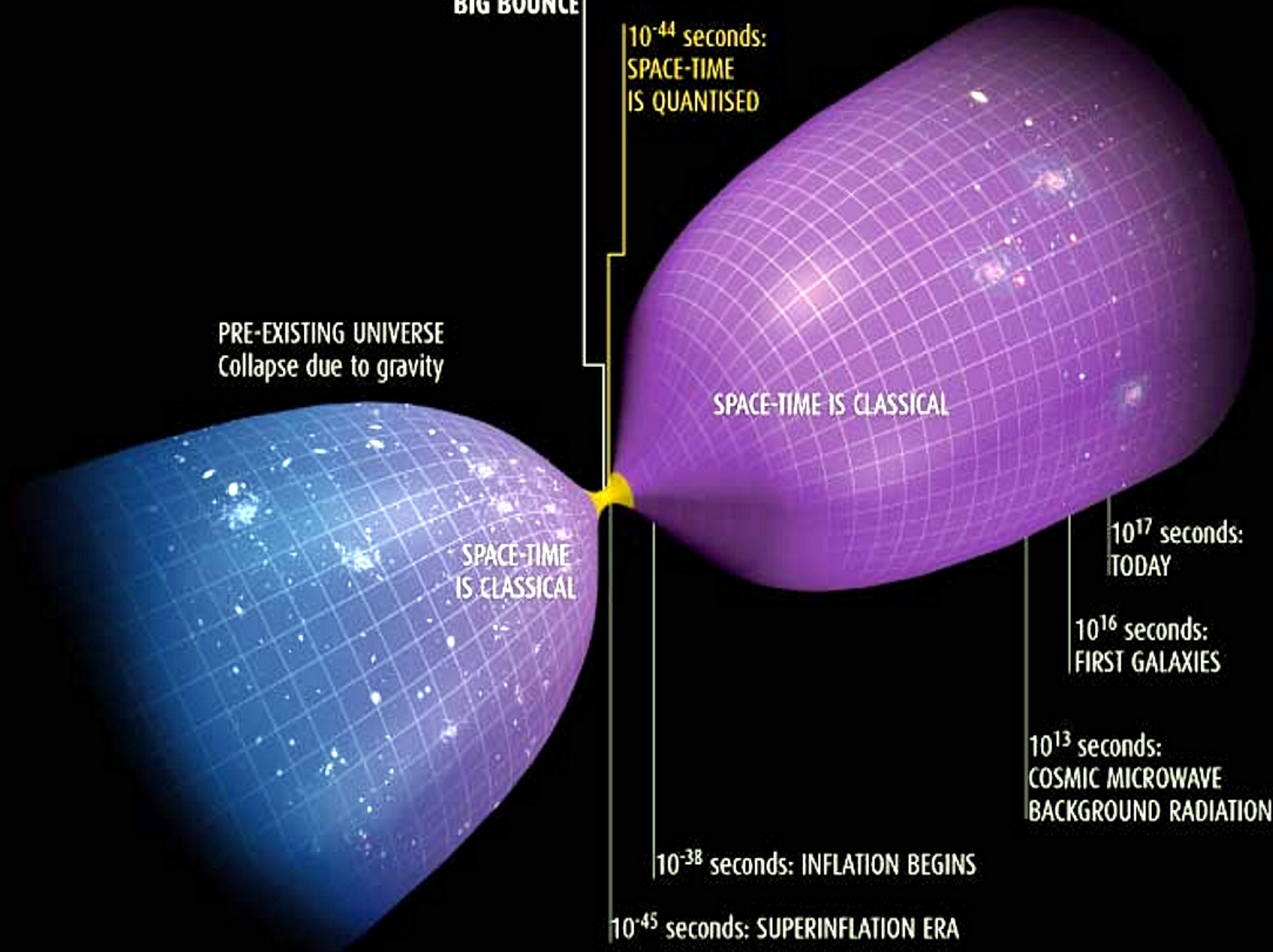
$10^{17}$  seconds:  
TODAY

$10^{16}$  seconds:  
FIRST GALAXIES

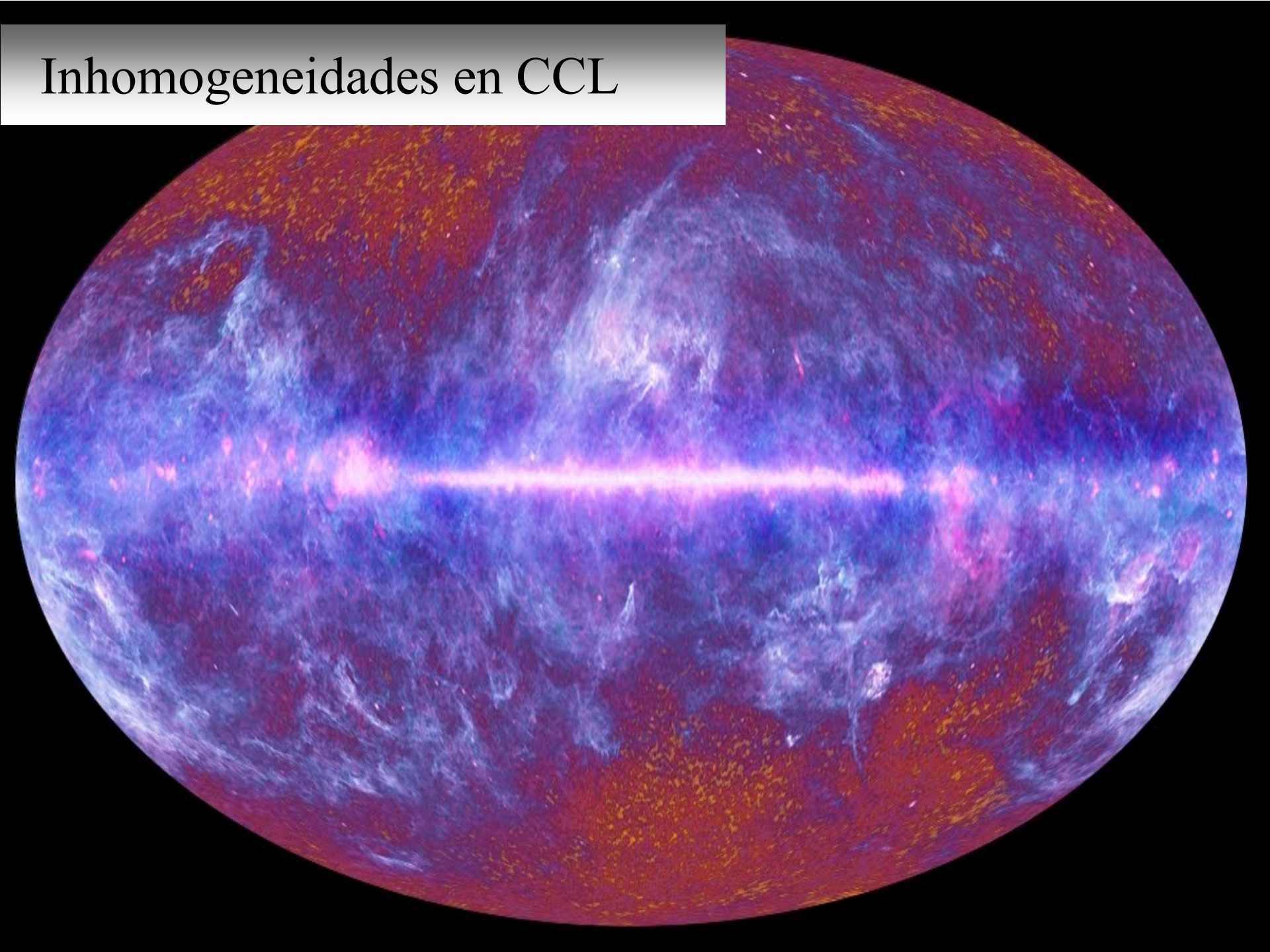
$10^{13}$  seconds:  
COSMIC MICROWAVE  
BACKGROUND RADIATION

$10^{-38}$  seconds: INFLATION BEGINS

$10^{-45}$  seconds: SUPERINFLATION ERA



# Inhomogeneidades en CCL





# Inhomogeneidades en CCL

## ■ FORMALISMO HÍBRIDO

- ➡ Cuantización de lazos de los grados de libertad homogéneos de la geometría.
- ➡ Cuantización de Fock de las inhomogeneidades.
- Se asume una jerarquía en la relevancia de fenómenos cuánticos geométricos.
- Teoremas recientes aseguran la **UNICIDAD** de la cuantización de Fock.

## ■ OTROS FORMALISMOS:

- ★ Inclusión de correcciones de holonomía y del inverso de volumen por anomalías.
- ★ Teoría cuántica de campos en espaciotiempos corregidos cuánticamente: métricas revestidas.

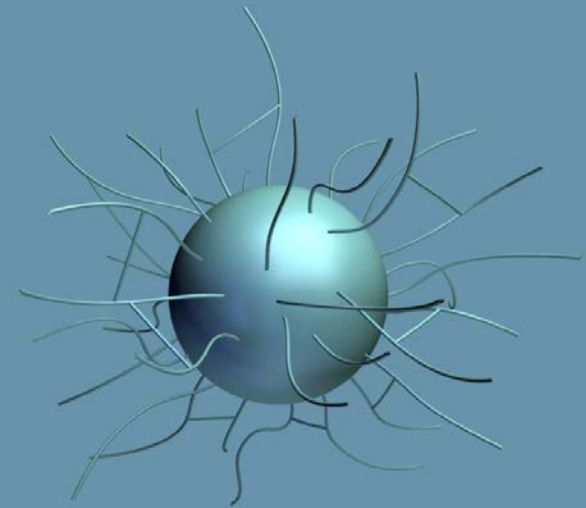
## OTROS RESULTADOS:

- Favorece la INFLACIÓN.



- Elimina singularidades de AGUJEROS NEGROS.

- Explica la entropía del horizonte de los AGUJEROS NEGROS



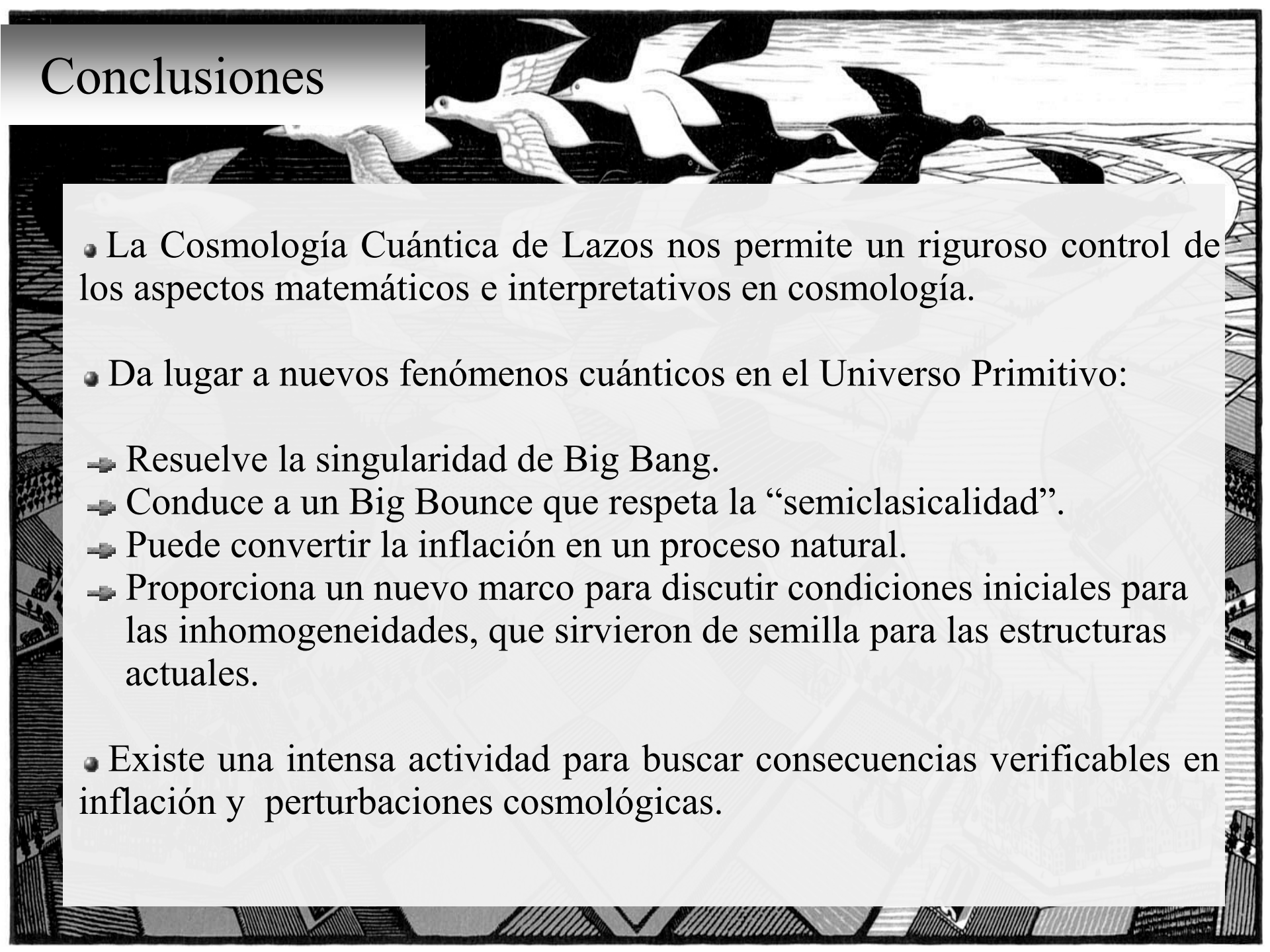


- 
- Ligadura escalar.
  - Perturbaciones cosmológicas.
  - Régimen semiclásico...

Aún falta por hacer para alcanzar una teoría completa y extraer predicciones observables.



# Conclusiones

- 
- A black and white illustration of several birds in flight, possibly geese or swans, moving from left to right across the top of the slide. Below them, a stylized cityscape with various buildings and structures is visible, rendered in a sketchy, artistic style. The entire slide is framed by a decorative border with geometric patterns.
- La Cosmología Cuántica de Lazos nos permite un riguroso control de los aspectos matemáticos e interpretativos en cosmología.
  - Da lugar a nuevos fenómenos cuánticos en el Universo Primitivo:
    - ➡ Resuelve la singularidad de Big Bang.
    - ➡ Conduce a un Big Bounce que respeta la “semiclasicalidad”.
    - ➡ Puede convertir la inflación en un proceso natural.
    - ➡ Proporciona un nuevo marco para discutir condiciones iniciales para las inhomogeneidades, que sirvieron de semilla para las estructuras actuales.
  - Existe una intensa actividad para buscar consecuencias verificables en inflación y perturbaciones cosmológicas.